

突起物を利用して水平面を移動可能な生物模倣型ソフトロボット

著者	釜井 大樹
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-7
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022827

突起物を利用して水平面を移動可能な 生物模倣型ソフトロボット

A BIO-INSPIRED SOFT ROBOT THAT USES FEATURES OF IT'S ENVIRONMENT TO LOCOMOTE OVER A HORIZONTAL PLANE

釜井大樹

Hiroki KAMAI

指導教員 伊藤一之

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

In this paper, we propose a bio-inspired soft robot made of silicon with two arms that can grasp various protrusions without using sensors, and then move. The proposed robot utilizes a mechanism similar to an octopus's grasping behavior and spider starfish's pattern of locomotion. It has been confirmed that an octopus can cover or grasp objects of unknown shape by bending its arms in order from root to tip [11-12]. Similarly, spider starfish are able to either walk over flat ground or pull themselves along through terrain with many protrusions [13]. Our robot has been designed to mimic this pulling pattern of locomotion.

Key words : *bio-inspired, soft robot, using protrusions,*

1. はじめに

一般的なロボットの制御方法の一つに、モデルベースド制御がある。これは、センサなどを用いて、実世界の環境やロボットの状態を計測し、全て情報の世界に取り込むことで把握し、そこから最適解を計算することで制御を行う方法である。この方法は、工場のように、環境の変化がなく、状態を把握する必要があるものが一定な環境などでは有効である[1-4]。

しかし、未知で環境が変化するような災害現場などでは、複雑な環境を把握するために計測機器が増加し、それに伴って計算時間も増加するため、モデルベースド制御は実時間での制御が困難という問題点がある[3-4]。

一方、自然界に目を向けると、ヒトデなどの棘皮動物や昆虫などの小さな脳しか持たない生物が、複雑な環境を実時間で処理し、適応的に振る舞うことができる。このメカニズムは完全に理解されていないが、生物が実世界をアフォーダンスとして利用することで、生物自身の身体の特徴を活かして実世界を抽象化・汎化し、脳への負担を軽減していると考えられる[5]。

ここで、ダイナミクスベースド制御という制御方法について述べる。これは、ロボットのボディを用いて実世界のダイナミクスを取り出し、それを利用することで制御を行う方法である。

ダイナミクスベースド制御はモデルベースド制御と違

い、ロボットのボディの特性を活かして制御を行うため、実世界をすべて計測する必要がなく、計算量を軽減できることや、環境が異なったとしても、あくまでも動作原理が同じように活用できれば制御可能なため、環境の変化に強いという特徴がある[3-7]。

また近年、ソフトロボットが注目を集めている。ソフトロボットは柔らかい素材でできており、生体などに当たっても衝撃が小さいため、安全性が高いことや、自身の柔軟性を活かして環境に受動的に適応することができるため、複雑な環境を汎化することで情報の抽象化ができる[8-10]。そのため、コンピュータの計算量を軽減することができ、ロボットを実時間で制御できると考えられる。

本研究では、クモヒトデの歩行戦略を模倣し、実世界の特徴を制御系に組み込み、さらに、1つのアクチュエータでひもを引く、緩ませるという動作のみによって、突起物を計測することなく把持し、それを支点にして水平面上を推進するソフトロボットを提案する。

2. 関連研究

(1) TAOYAKA-S II

タコは根元から先端に向かって順に脚を物体に接触させることで、物体の把持を可能にしている。そのため、大きさや形状が異なっているものでも、同一の動作戦略を用いることで物体を計測することなく把持することができ

る[11-12].

TAOYAKA-S IIはタコの把持戦略を模倣し、柱状物を把持することを可能にしているロボットである。

しかし、TAOYAKA-S IIは柱状物を把持する腕と機体を上昇させる胴体が完全に独立しているため、アクチュエータが複数必要になり、制御対象が増えてしまっている。

(2) クモヒトデの歩行戦略

クモヒトデは進行方向に物体があり、腕が物体と触れたとき、推進の助けになる場合は積極的に活用し、推進の妨げになる場合は活用しないことが確認されている。物体から得られる反力が推進の助けになるような場合は腕を積極的に物体に押し付けるが、逆に推進の妨げになる場合は物体をすり抜けるように腕を前方に運ぶのである[13].

3. 提案機構

本研究では、タコの把持戦略とクモヒトデの歩行戦略を模倣し、制御系にセンサなどを搭載せず、なおかつアクチュエータでひもを引く・緩めるといった動作のみでロボットが障害物を把持し、その後推進することを可能にする機構を提案する。提案するロボットの全体を Fig.1 に示す。

クモヒトデは障害物を巧みに利用することで推進を促進する。また、ソフトロボットはその柔軟性を活かして、環境に受動的に適応することができるため、複雑な環境を汎化することで情報の抽象化ができる。そのため、コンピュータの計算量を軽減することができると考えられる。さらに、回転機構を用いないことで、空転や草に絡まりロックされる等の問題を解決する。

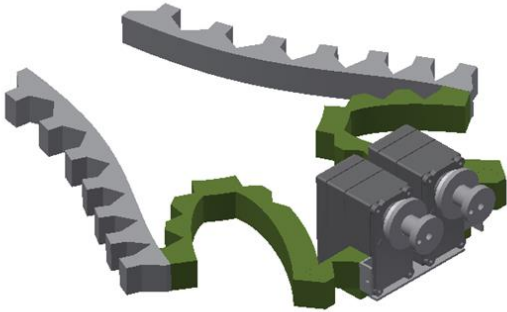


Fig. 1 提案するロボットの全体

(1) 物体同士が触れたときの滑るか否かの条件

物体同士が触れたとき、その物体が滑るか否かの条件を確認する。

Fig. 2 左下図の x 成分より、

$$F_{in} \sin \theta_f \leq \mu F_{in} \cos \theta_f \quad (1)$$

μ : 静止摩擦係数 θ_f : 最大静止摩擦角

のとき、 $F_{in} = F_{out}$ より、損失なく出力されていることが分

かる。

一方、Fig. 2 右下図の x 成分より、

$$F_{in} \sin \theta > \mu' F_{in} \cos \theta \quad (2) \quad \mu' : \text{動摩擦係数}$$

のとき、 $F_{out} > F_{in}$ より、出力に損失が生じていることが分かる。

式(1),(2)より、滑るか否かは力の大きさではなく、 μ が $\tan \theta_f$ 以上のとき物体は滑らず、 μ が $\tan \theta_f$ より小さいとき物体は滑ることがわかる。

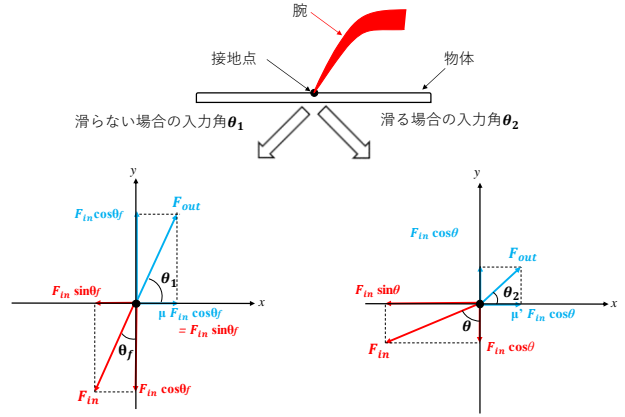


Fig. 2 入力角と摩擦角の関係

(2) 螺旋の特性

螺旋について着目する。

螺旋は円と異なり、常に半径が変化している。円が物体と触れている状態で原点を中心に回転させた際、入力角が常に0度のため、摩擦角によっては滑りながら進み、効率が悪くなる。また、物体と触れていない状態で原点を中心に回転させた際、その場で回転するだけである。一方螺旋は物体と触れていない状態であっても、原点を中心に回転させた際、いずれ物体と触れると考えられる。

そのため、半径が大きくなるにつれて入力角も大きくなっていくような螺旋を提案する。

ここで、2点 $P_i(x_i, y_i)$ 、 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 間を結んでできる線の傾きを m_1 、原点を中心に、 P_i, P_{i+1} を結んでできる線の中点まわりのモーメントの向きの傾きを m_2 とする。提案する螺旋の一部を Fig. 3 に示す。

このとき m_1, m_2 はそれぞれ式(3),(4)で表すことができる。また m_1, m_2 を構成するパラメータを式(5),(6),(7)に示す。 r_1, r_2 はそれぞれ原点 O から点 P_1, P_2 までの距離である。

$$m_1 = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (3)$$

$$m_2 = -\frac{x_{i+1} - x_i}{y_i + y_{i+1}} \quad (4)$$

$$r_{i+1} = s r_i \quad s : \text{比例定数} \quad (5)$$

$$x_i = r_i \cos \theta_i, \quad y_i = r_i \sin \theta_i \quad (6)$$

$$x_{i+1} = r_{i+1} \cos \theta_{i+1}, \quad y_{i+1} = r_{i+1} \sin \theta_{i+1} \quad (7)$$

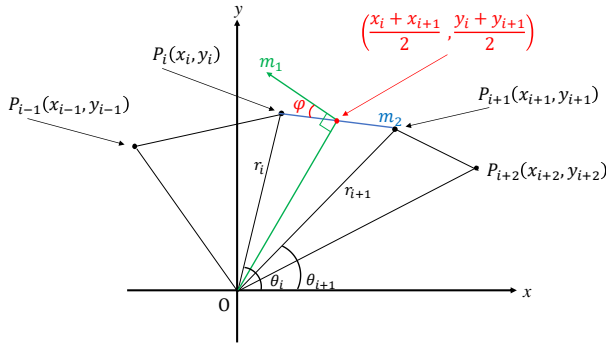


Fig. 3 提案する螺旋の一部

入力角 φ は m_1 と m_2 の傾きを以下の式(8)に代入することより求めることができる。

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{m_1 - m_2}{1 + m_1 m_2} \right) \quad (8)$$

式 (8) に式(3)~(7)を代入して、 θ について整理すると

$$\varphi = \left| \frac{1 - s^2}{2s} \frac{1}{\sin(\theta_{i+1} - \theta_i)} \right| \quad (9)$$

となる。

式(9)から、入力角 φ は、 θ_i と θ_{i+1} の差によって変化することが分かる。ここで、 $\theta_{i+1} = \alpha \theta_i$ (α : 変数) としたとき、式の更新する前に $\theta_i = \theta_{i+1}$ とし、 α の値を徐々に小さくしていくと、 θ_i と θ_{i+1} の差も徐々に小さくなる。そのため、 $\sin(\theta_{i+1} - \theta_i)$ の値は小さくなっていき、式(7)から、入力角 φ は大きくなっていくことが分かる。

このとき、式(5)から、半径 r は定数 s 倍で大きくなっていくことが分かる。そのため、これらの条件を満たすことで、半径が大きくなりつつ、入力角も大きくなるような螺旋を描けると考えられる。

これらの条件を満たし、描いた螺旋を Fig. 4 に示す。

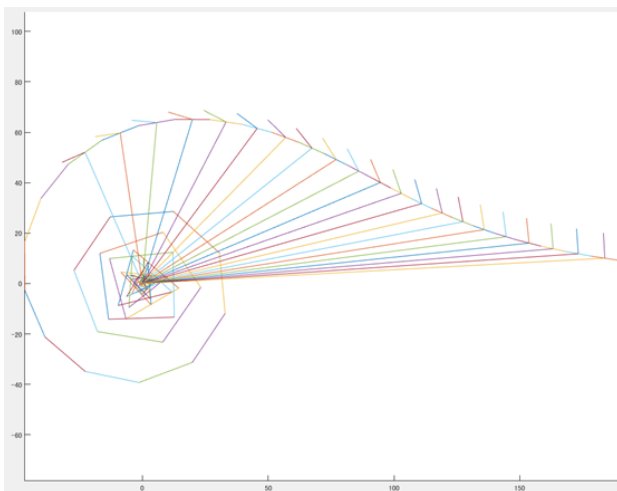


Fig. 4 提案する螺旋

Fig. 4 から、提案する螺旋は、半径が大きくなるにつれて入力角が大きくなっていることが分かる。

この螺旋を参考に設計した腕を Fig. 5 に示す。腕は (A) : 把持部, (B) : 推進部, (C) : 回転部の 3 つに分かれており、厚さはすべて 12 mm である。また、腕 (C) の可動部が螺旋の原点に来るよう位置づけられている。

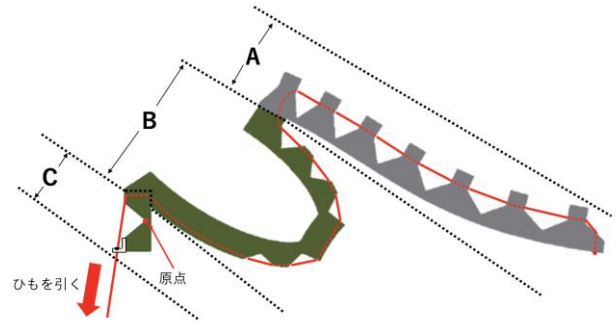


Fig. 5 提案する腕

(3) 腕 (A) : 把持部

作成した腕 (A) の寸法と物体への入力角を Fig. 6 に示す。腕 (A) は、腕 (B) よりも先に曲がるようにするために、腕 (B) よりも柔らかい硬さ 30A のシリコンで作製した。

腕 (A) は螺旋に沿うよう位置づけられている。螺旋に沿うことによって、腕 (A) が物体に触れ、触れた点の入力角がシリコンと物体の摩擦角よりも小さい場合には滑る。その後、腕 (C) の可動部がさらに曲がることによって、先端に向かって滑っていくため、いずれ触れた点の入力角がシリコンと物体の摩擦角以上になり、滑らなくなると考えられる。その後、滑らなくなった点を中心に腕 (A) が物体を把持する機構になっている。

また、各可動部の角度を根元から順に大きくし、さらに厚さも順に厚くすることで、曲がるのに必要な力を根元から順に大きくしている。こうすることによって、単にひもを引くという単純な動作のみにも関わらず、根元から先端に向かって順に曲がるようになり、タコの把持戦略を模倣した機構となっている。

さらに、布を上面、底面につけることによって、水平方向への柔軟性は保ちつつ、垂直方向ならびにねじれ方向へ高い剛性を実現している。そのため、腕 (A) が物体を把持した際、ひもを引く力が腕 (A) のねじれる力に変換されることを防いでいる。

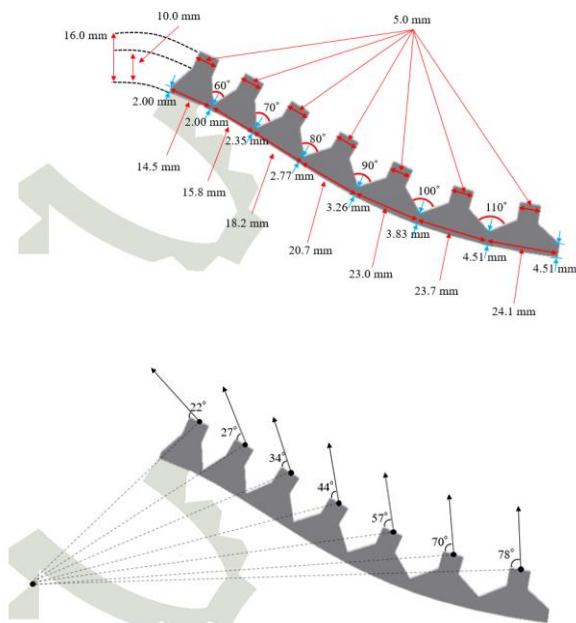


Fig. 6 腕 (A)

上：寸法

下：原点まわりのモーメントによる各入力角

(4) 腕 (B) : 推進部

作成した腕 (B) の寸法を Fig. 7 に示す。腕 (B) は、腕 (A) が物体を把持した後に曲がらなくてはならないため、腕 (A) よりも硬い硬さ 60A のシリコンで作製した。腕 (A) よりも硬いシリコンを用いることで、単にひもを引くという動作のみにもかかわらず、腕 (A) が曲がった後に腕 (B) が曲がり胴体 (2 つのサーボモータ) を推進させる機構となっている。

腕 (B) が胴体を推進させる際、胴体をより遠くに推進するために、長さが必要だった。そのため、腕 (B) を楕円形にすることで、長さを確保した。また、胴体側に設計することで、機体の横幅が広がるのを防いでいる。

このとき、1 つの楕円のみで腕 (B) を設計した際、頂点付近の可動部が硬くなってしまったので、一部異なる楕円を組み込むことで、これを解消した。

また、各可動部の角度を、腕 (A) 側から順に大きくし、さらに厚さも順に厚くすることで、腕 (A) に近い可動部から曲がるようにした。こうすることによって、突起物を把持した後、腕 (A) を支点にして、小回りに推進させられるようにしている。可動部の伸縮量を調節することで、障害物間における様々な距離での移動を可能にしている。

さらに、腕 (A) と同様に、布を上面、底面につけることによって、腕 (B) が曲がる際、ねじれることを防いでいる。

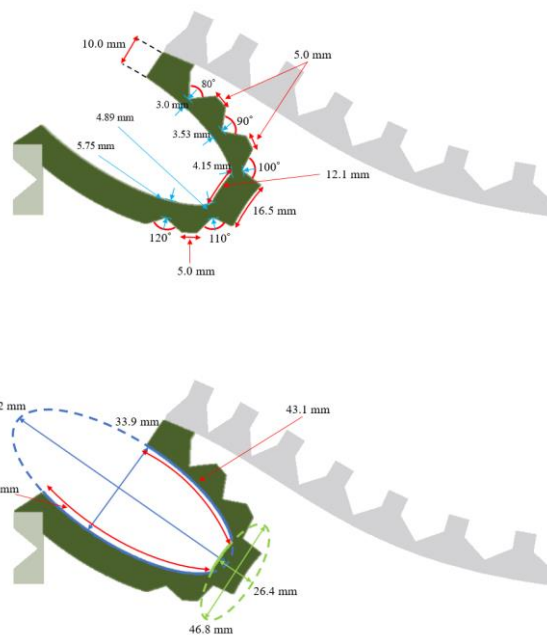


Fig. 7 腕 (B) の寸法

(5) 腕 (C) : 回転部

作成した腕 (C) の寸法を Fig. 8 に示す。腕 (C) は、硬さ 60A のシリコンで作製した。腕 (A) や腕 (B) よりも先に曲がるようにすることで、腕全体が傾き、障害物に触れるまで動くようにしている。

腕 (A) と同様に、布を上面、底面につけることによって、腕 (C) が曲がる際、ねじれることを防いでいる。

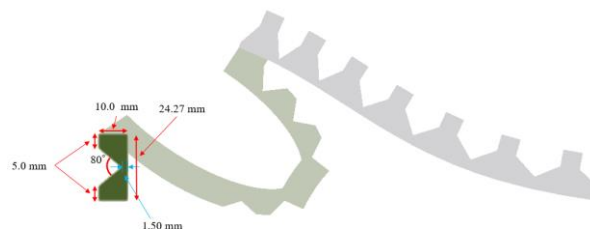


Fig. 8 腕 (C) の寸法

実際に作成した機体の通常時と腕を縮めたときの全体図をそれぞれ Fig. 9, 10 に示す。また、使用した電源とサーボモータをそれぞれ Table 1 に示す。

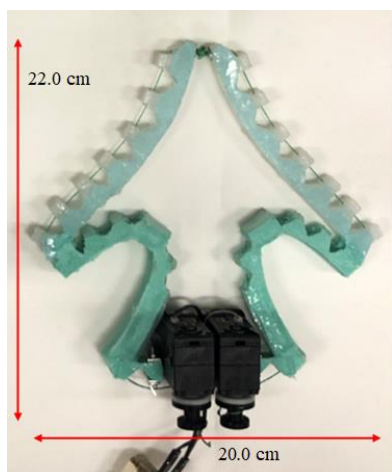


Fig. 9 機体の全体（通常時）

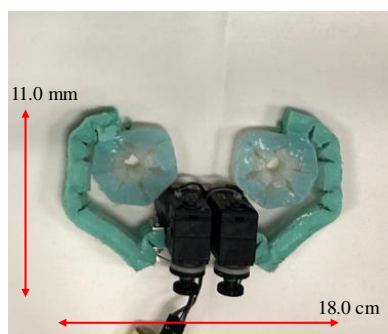


Fig. 10 機体の全体（ひもを引いた時）

Table 1 使用した電源とサーボモータ

電源	直流安定化電源 12 V 30 A
サーボモータ	KONDO KRS-2552 RHV ICS

Fig. 9,10 から、腕を縮めると、通常時の腕と比べて縦が 11 cm, 幅が 2 cm 小さくなることを確認できる. そのため、片方の腕を縮めた際、縦が 11 cm, 幅が 1 cm 小さくなる.

Fig. 11 に提案するロボットが動作の様子を示す.

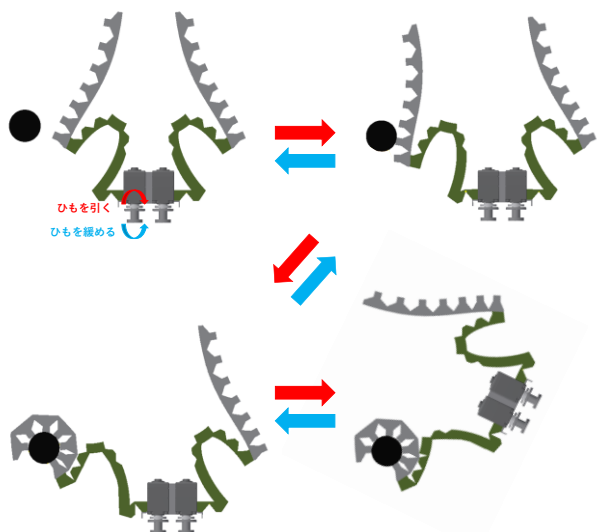


Fig. 11 提案するロボットの動作の様子

4. 実験

(1) 様々な大きさや形状の突起物の把持および推進

ロボットがどのような大きさや形状の物体を把持できるかの実験を水平面上で行った. 実験結果を Fig. 12, Table 2 に示す. また、把持ができたか否かは、突起物に腕 (A) が巻きついた後、腕 (B) が曲がる際、腕 (A) を支点にして、胴体を前に推進できたか否かで判断した.

Fig. 12 より、腕 (C) が曲がり、腕全体が傾いた後、腕 (A) が突起物に触れた点を中心に把持し、それを支点に腕 (B) が曲がることで、胴体が推進したことが確認できた.

これにより、タコの把持戦略を模倣し、様々な大きさや形状の突起物を計測なしで把持することができることを確認できた. ロボットの制御系には突起物の大きさや形状は用いられておらず、単にひもを引くという動作のみで未知物体を把持できたことから、身体の特性を利用した制御が行われていることが確認できた.

一方、突起物が 10×10 mm 以下のとき、腕 (A) が縮んだときの内径よりも小さいため、把持ができず、推進することができなかった. また、突起物が 35×35 mm 以上のとき、腕 (A) を包むことはできたが、把持できていなかったため、腕 (B) が胴体を推進させる際、腕 (A) が胴体に引き寄せられてしまい、推進することができなかった.

これらのことから、提案するロボットは、突起物が 15×15 mm 以上 30×30 mm 以下のとき、形状に関わらず腕 (A) が把持し、機体を推進することができることを確認した.

Fig. 13 に実験で使用した様々な突起物を示す.

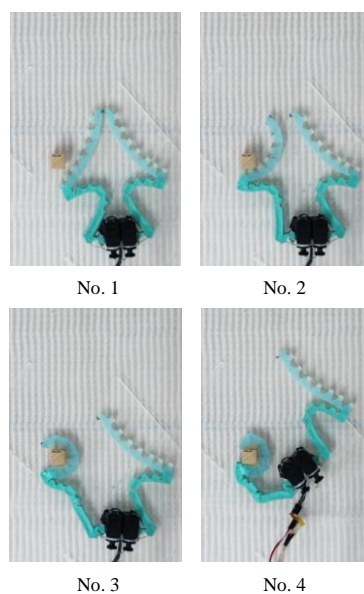
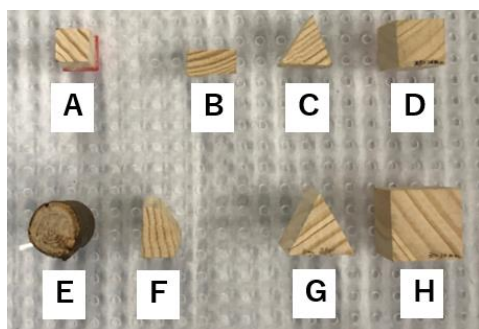


Fig. 12 把持および推進実験 (20×20 mm の物体の時)

Table 2 腕 (A) の把持能力

突起物の大きさ	結果
10×10 mm	把持不可能
15×15 mm	把持可能
20×20 mm	把持可能
25×25 mm	把持可能
30×30 mm	把持可能
35×35 mm	把持不可能



(A : 15.0 × 15.0 mm B : 10.0 × 20.0 mm)
 (C : 17.3 × 20.0 mm D : 20.0 × 20.0 mm)
 (E : 23.0 × 23.0 mm F : 25.0 × 20.0 mm)
 (G : 26.0 × 30.0 mm H : 30.0 × 30.0 mm)

Fig. 13 様々な突起物 (縦×横)

(2) 突起物間のさまざまな間隔の通過

ロボットが突起物間の間隔を通過できるかの実験を水平面上で行った。実験結果を Fig. 14, Table 3 に示す。通過ができたかどうかは、片方の腕で突起物を把持しそれを支点に推進した後、もう一方の腕で突起物を把持し、再度推進できたかどうかで判断した。

Fig. 14 より、両方の腕が突起物に触れた状態で、片方の腕のひもを引くことで、もう一方の腕の短軸が短くなることで機体の幅が短くなり (No. 3), 通り抜けることができる。次に、通り抜けた腕のひもを一度引き、その後解放することで、腕 (A) が突起物を把持できる位置に持っていくことができる。その後、最初に把持した腕を解放し、通り抜けた腕のひもを引くことで、最初に把持した腕も通り抜け、障害物間を通過できることが確認できた。

一方、突起物間の間隔が 14 cm 以下のとき、腕の短軸が短くなっても機体幅が 14 cm より大きいため、通過することができなかった。

また、突起物間の間隔が 21 cm 以上のとき、腕で突起物を把持し推進した後、もう一方の腕で突起物を把持しようとしても、腕が届かないため、把持することができず、推進させることができなかった。

これらのことから、提案するロボットは、突起物間の間隔が 15 cm 以上 20 cm 以下の時、通過できることを確認した。

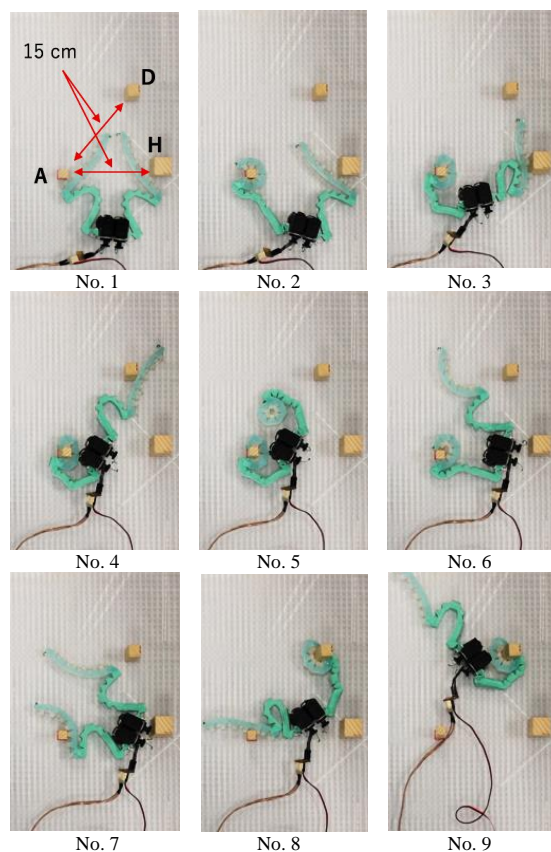


Fig. 14 突起物間の通過実験 (15 cm のとき)

Table 3 突起物間の各間隔におけるロボットの通過能力

突起物間の間隔	結果
14 cm	通過不可能
15 cm	通過可能
16 cm	通過可能
17 cm	通過可能
18 cm	通過可能
19 cm	通過可能
20 cm	通過可能
21 cm	通過不可能

(3) 歩行 (ルートの選択)

制御方法をマニュアル操作にし、進行できる方向が 2 つある場合にルートを選択できることを示すための実験を水平面上で行った。実験結果を Fig. 15,16 に示す。

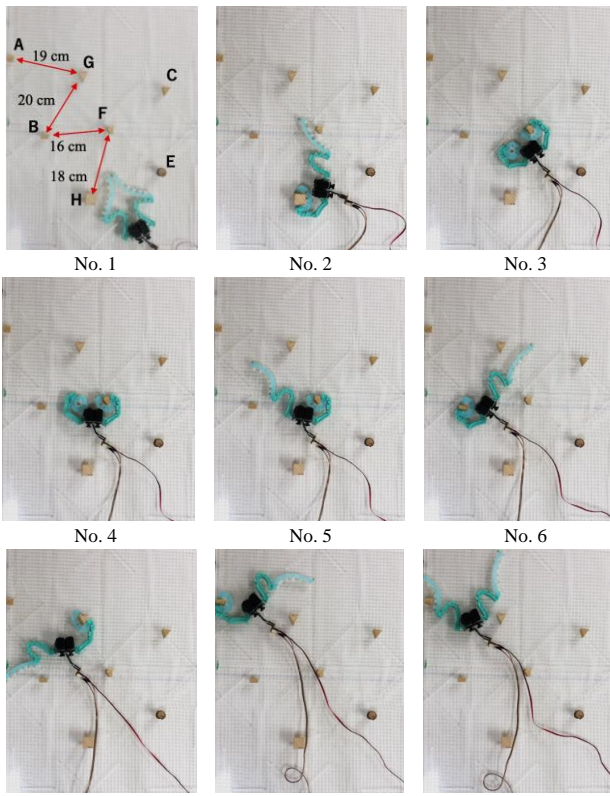


Fig. 15 マニュアル操作によるルートを選択 (1)

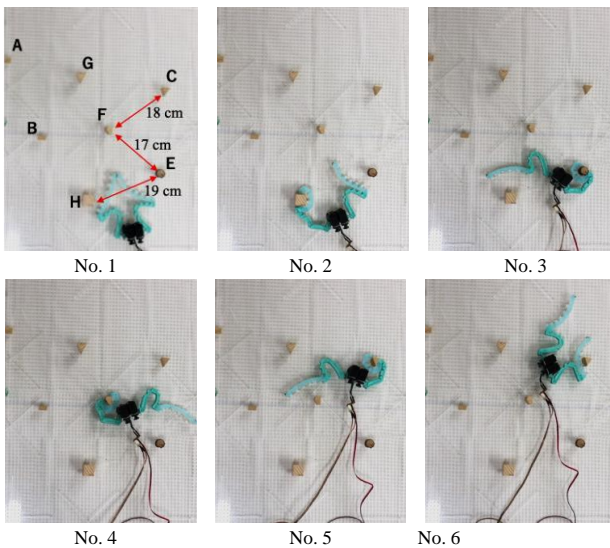


Fig. 16 マニュアル操作によるルートを選択 (2)

Fig. 15, 16 より、歩行ルートに選択肢がある場合、ロボットの制御方法をマニュアル操作にすることで、ルートを選択できることを確認した。

(6) 結言

本研究では、ひもを引く・緩めるという動作のみで、センサなどを用いずに突起物を把持し、それを支点にして水平面上を推進するソフトロボットを作成した。

実験を通して、様々な大きさの突起物の把持ならびに機体幅より小さい間隔を通過できることを確認した。また、マニュアル操作によってルートを選択できることを確認した。

今後の展望として、より様々な大きさや形状の突起物の把持ならびに突起物間の間隔の通過、さらに、斜面や垂直の壁においても歩行できるようにすることで、より多くの環境に適應できるロボットの開発を行う予定である。

謝辞：最後に、本研究に際して多大なるご指導、ご協力をいただいた法政大学理工学研究科電気電子工学専攻伊藤一之教授、また、知能ロボット研究室の方々に心から感謝いたします。今後の皆様のご健闘を心から願うとともに、法政大学における各研究において、本論文がほんのわずかながらでも参考になればと願うものであります。

参考文献

- 1) F. Matsuno, Y. Uo, "Current trends in research and development of rescue robot systems," Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 129, No. 4, pp. 232-236, 2009
- 2) S. Tadokoro, "Technical challenge of rescue robotics," Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 28, No. 2, pp. 134-137, 2010
- 3) 伊藤一之 "「実世界の性質を利用した知覚と制御」特集について", Vol. 24, No. 7, p. 775, 2006
- 4) 齋藤 明日希, 永山 和樹, 本間 義大, 青柳 龍志, 伊藤 一之, 大道 武生, 芦澤 怜史, 松野 文俊 "三次元環境を移動可能な多脚型ロボット-身体の柔軟性を利用した未知環境への適應-" 計測自動制御学会論文集, Vol. 54, No. 9, pp. 695-704, 2018
- 5) S. H. Collins, M. Wisse, A. Ruina, "A Three-Dimensional Passive Dynamic Walking Robot with Two Legs and Knees," The International Journal of Robotics Research, Vol. 20, No. 7, pp. 607-615, 2001
- 6) 大須賀 公一 "ダイナミクススペース制御の「こころ」", Vol. 24, No. 7, pp. 797-799, 2006
- 7) Rolf Pfeifer, Fumiya Iida, Gabriel Gomez "Designing Intelligent Robots -On the Implications of Embodiment-" 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 7, pp. 783-790, 2006
- 8) 則次俊郎, 久保田充彦, "空気圧ソフトアクチュエータを用いた管内移動ロボットの開発" 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 831-838, 2000
- 9) 内山勝 "ソフトロボティクス" 日本ロボット学会誌 Vol. 17, No. 6, pp. 756-757, 1999
- 10) Taichi Mukai, Kazuyuki Ito "Flexible manipulator inspired by octopi: Comparative study of pushing and pulling mechanisms in realizing intelligent behavior" proc. of the Twenty-fourth International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 24th), pp. 393-396, 2019
- 11) G. Sumbre, Y. Gutfreund, G. Fiorito, T. Flash and B. Hochner, "Control of octopus arm extension by a peripheral motor program", Science, Vol. 293, No. 5536, pp. 1845-1848, 2001
- 12) Y. Gutfreund, T. Flash, G. Fiorito, and B. Hochner, "Patterns of arm muscle activation involved in octopus reaching movements" Journal of Neuroscience, Vol. 18, No. 15, pp. 5976-5987, 1998
- 13) 加藤剛史, 石黒章夫 "クモヒトデに学ぶレジリエントな振る舞いの設計原理" 計測と制御, 54 巻 4 号 p. 254-259, 2015